

23147

PROVINCIA DE BUENOS AIRES — CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES
ESTUDIO DE LA ZONA DEPRIMIDA DEL SALADO

Consejo Federal de Inversiones
SUBSEDE LA PLATA
BIBLIOTECA

COMUNICACION AL

SIMPOSIUM "FLORENTINO AMEGHINO"

TITULO

"ESTUDIO EN MODELO MATEMATICO DE LA ZONA
DEPRIMIDA DEL SALADO"

AUTOR

ACUERDO C.F.I. - M.A.A. - M.O.P.

- I N D I C E -

1. INTRODUCCION
2. DESCRIPCION FISICA DE LA REGION
 - 2.1. Aspectos hidrológicos
 - 2.2. Aspectos geológicos
 - 2.3. Aspectos edafológicos
3. EL MODELO MATEMATICO
 - 3.1. Generalidades
 - 3.2. Submodelo de balance hídrico
 - 3.3. Submodelo de transferencias
 - 3.4. Calibrado y explotación

1. INTRODUCCION

Desde hace casi cien años, la Zona Deprimida del Salado ha sido objeto de planes, proyectos y programas de distintas concepciones y niveles que van desde los ya históricos proyectos de drenaje hasta las actuales investigaciones detalladas de suelos.

En este período se han producido gran número de informes y trabajos técnicos los que, en general, han apuntado a objetivos parciales o sectoriales, notándose la falta de un estudio global e integrado donde se analicen las interrelaciones de los elementos actuantes en la región.

Esta situación se ha agravado con la polarización de las opiniones técnicas, que ha abierto una polémica de larga data. Aún así, no cabe duda en el consenso general de que el problema dominante en la región lo constituyen las inundaciones y sequías que alternativamente la afectan, coincidiéndose también, al menos teóricamente, en que las soluciones deben apuntar al control del movimiento de las grandes masas de agua precipitada.

La provincia de Buenos Aires, a través de sus Ministerios de Obras Públicas y de Asuntos Agrarios, y el Consejo Federal de Inversiones acordaron en el mes de mayo de 1977 la realización de estudios, trabajos e investigaciones en la cuenca del Río Salado. Con fecha 10 de marzo ppdo. fue firmada un Acta Acuerdo Complementaria en la que se aprueba el Plan de Trabajos que actualmente se está llevando a cabo.

En su conjunto, el Plan de Trabajos gira en torno de la elaboración de un modelo matemático hidrológico de simulación de la cuenca.

Este modelo deberá simular matemáticamente el ciclo hidrológico, y mediante él se pretende determinar los efectos de crecidas y sequías de recurrencia conocida, tanto en las condiciones actuales de la cuenca, como en condiciones modificadas por obras y prácticas de manejo de suelos proyectadas.

Paralelamente, se prevé desarrollar un modelo económico que permita evaluar los efectos de estas obras y prácticas de manejo, de modo tal de asignar a cada una de ellas, además de una caracterización física de sus efectos, una relación costo-beneficio que justifique o no llevar adelante etapas más avanzadas de proyecto y ejecución.

//.

2. DESCRIPCION FISICA DE LA REGION

2.1. Aspectos hidrológicos

La cuenca tributaria del río Salado es de mayor extensión que la de limitada, ya que nace en la Provincia de Santa Fe y atraviesa la de Buenos Aires para desembocar en el río de La Plata en la Bahía Samborombón. Debido a la existencia de una estación limnigráfica en la localidad de Achupallas, que proporciona datos continuos de alturas y caudales, puede prescindirse del área de aporte aguas arriba de la mencionada estación. Lo mismo sucede con la cuenca del arroyo Vallimanca aguas arriba de la ruta N° 226, por existir allí otra estación registradora que provee los datos representativos de su cuenca alta.

El río Salado, que corre de NO a SE, presenta las características de los ríos de llanura: curso con meandros, meandros abandonados que constituyen lagunas en forma de media luna; en zonas de baja pendiente, expansiones lagunares (Plano N° 2).

Los afluentes de la margen N presentan cauces definidos (Cda. de Chivilcoy, A° Las Saladas, A° Saladillo, A° El Siasgo) en la zona de mayor pendiente o cursos que encadenan embalses naturales (lagunas Encadenadas de Chascomús), en su curso inferior.

Los afluentes de la margen S, con una orientación general del SO al NE, presentan mayor longitud, su principal afluente, en las Sierras de la Ventana, y el resto de ellos en las Sierras de Tandil (A° Las Flores, A° Tapalqué, A° Azul, A° Los Huesos, A° Chapaleofú, A° Tandileofú). Todos ellos presentan cursos bien definidos en las zonas de altas y medianas pendientes para hacerse difusos en la pampa deprimida, efecto que trató de moderarse encauzando las aguas de muchos de ellos por los canales de desagües del Plan Nystromer.

El área de estudio tiene en cuenta, además, la llamada "cuenca con desagüe al mar", constituida por los A° Las Chilcas y Napaleofú (encauzados por los canales N° 5 y 6) y los A° Grande, Dulce y Vivoratá que desaguan en la Laguna de Mar Chiquita.

La ubicación geográfica del área (su eje central coincide con el paralelo 36° latitud sur) la incluye en las zonas templadas del globo.

La relación entre tierra y mar (94% de mar, 6% de tierras) le dan -

//.

carácter de "oceanidad" con una mayor disponibilidad de humedad que en zonas de igual lat. en el hemisferio Norte.

El relieve no tiene un efecto acentuado. Es prácticamente nulo el efecto de las Sierras Septentrionales como condensadoras de precipitación, - influyendo sólo en el régimen térmico.

El saldo de energía disponible es bajo, por lo que resulta una relativa estabilidad del aire y como consecuencia, un clima más moderado que en otras zonas de la misma provincia.

En cuanto a la circulación general de la atmósfera prevalecen los frentes, a veces combinados con procesos de convección. Esto da como resultado precipitaciones con distribución areal homogénea y varios días de duración.

El efecto de la proximidad del mar, produce un amortiguamiento de los contrastes térmicos en la zona cercana a la costa.

Un período anual tipo (logrado de series estadísticas representativas, período 1923-73), indica que:

a) La temperatura del área varía levemente entre sus límites N y S. Las temperaturas medias del mes más cálido, enero, varían entre 23°C al N y 20°C al S. Las del mes más frío, julio, entre 9°C al N y 8°C al S.

b) Las precipitaciones tienden a distribuirse de manera homogénea, y sus volúmenes fluctúan entre 1000 mm/año al E y 800 mm/año al SO.

La frecuencia de días de lluvia (1 mm) es de 65 días/año y la densidad de precipitación (cantidad media de precipitación/día de lluvia) es de 12 a 14 mm/día (estos índices no son del todo representativos pues se observa una concentración de ambos en los períodos de primavera y de otoño, característica que se acentúa hacia el O).

c) Las tormentas en el área son de frente caliente, abarcando grandes extensiones, son continuas y de larga duración.

Las tormentas históricas, que no produjeron inundaciones, correspondieron al semestre del invierno (marzo a octubre) a pesar de tener menor precipitación que el semestre de verano (septiembre a abril).

Un análisis de un año medio de una serie de 42 años (1884-1931), dio como resultado para dichos períodos precipitaciones medias de 355 mm y 481 mm, respectivamente.

Las duraciones de las mayores tormentas históricas oscilaron entre 5 y -

//.

20 días.

- d) El balance hídrico para el área establece la existencia de excesos para el período invernal y déficits para el estival. El sector con variación de mayor amplitud corresponde a la Bahía de Samborombón, particularmente a la punta Norte del Cabo San Antonio.
- e) El almacenamiento de agua útil (el volumen que puede ser acumulado en el suelo) tiene fundamental importancia por el efecto moderador de excesos y déficits y por constituir agua disponible para la vegetación. Este almacenamiento puede ser utilizado por la vegetación entre el 50% y el 10% (saturación). El área bajo estudio se encuentra sobre el 100% 6 meses por año, dos meses por año está entre el 50 y 75% (situación llamada de "sequía condicional"). Solamente 4 meses se encuentra, en líneas generales, en situaciones intermedias, presumiblemente aceptables.
- f) Las relaciones interanuales muestran que existe una clara distribución con predominio de años lluviosos en los partidos ubicados sobre el curso del Salado, en cambio la zona de bajada de las sierras muestra predominio de años normales (en la serie analizada, más del 50% de los años fueron "normales", en 17 casos se registraron precipitaciones "excesivas", mientras que 6 años fueron "secos").
- g) La tendencia pluviométrica del área es a incrementar en 2 mm/año las precipitaciones invernales y a mantener el actual nivel de precipitaciones en el período estival, atribuible a una variación en la circulación atmosférica y al cambio de la cubierta vegetal.

Esta caracterización climática da una idea global de los derrames y almacenamientos de agua en el área, basada en análisis puntuales.

2.2. Aspectos geológicos

Geomorfológicamente participan de la región la porción Sudoriental de la Pampa Ondulada, que corresponde al sector donde se desarrollan los cauces del río Samborombón, arroyos Saladillo y El Siasgo afluentes por la margin izquierda del río Salado y las lagunas próximas a las localidades de Lo bos, San Miguel del Monte y Chascomús; el Sector de las Sierras Septentrionales, en el que se ubican las localidades de Tandil, Balcarce y Mar del Pla ta y tienen sus nacientes los arroyos de la vertiente norte de estas sierras; y la Comarca de la Pampa Deprimida correspondiente al sector de la bajada de las Sierras Septentrionales, surcada por los arroyos Las Flores, Azul, Chapa leofú, Tandileofú y Napaleofú entre los principales, y la porción litoral, - que incluye los cursos inferiores de los ríos Salado y Samborombón, hasta su desembocadura al mar, los cordones marinos entre Dolores y General Juan Mada riaga y la laguna Mar Chiquita.

Las formaciones geológicas sobre las que ha sido elaborado el paisaje de la región, pertenecen casi totalmente al Pampiano y Pospampiano de edad cuartárica. En el Pampiano, compuesto por limos loessoides de color pardo - con característicos niveles de tosca, ha sido grabada la red de drenaje actual cuyos valles principales están ocupados por los sedimentos pospampianos. El sector litoral se halla constituido por formaciones cuartáricas marí nas que engranan lateralmente hacia el O. con las formaciones pampianas y pos pampianas continentales.

La estructura profunda de la región se halla disimulada por la cobertu ra de sedimentos más modernos, que culminan con los terrenos pampianos, sin embargo, es llamativa la coincidencia de los sectores geomórficos diferenciados, con la disposición en el subsuelo de las rocas del basamento antiguo, - algunos de cuyos asomos superficiales se identifican en las Sierras Septen trionales. Este basamento rocoso rígido se hunde escalonadamente a favor de varias fracturas a partir del sector de las Sierras y, del sector Sudoriental de la Pampa Ondulada, hacia el N. y hacia el S. respectivamente, configurando la fosa estructural del Salado cuyo eje de máximo hundimiento, inclinado - hacia el naciente, coincide con la faja de máxima exondación de la Pampa De primida.

El agua freática se dispone en las formaciones pampianas y pospampianas a profundidades que varían entre 0 y 6 m, aumentando en el sector próxi-

//.

mo a las sierras. La superficie limitante superior de este cuerpo de agua subterránea es concordante con la forma de la superficie del terreno, está también sometida en forma directa a las acciones climáticas superficiales, por lo que su comportamiento influye y se relaciona con las características superficiales topográficas, geomorfológicas, de escurrimiento y suelos del lugar.

Desde el punto de vista hidrogeológico, los sedimentos pampianos y pospampianos, están integrados por sedimentos finos (limos y loess) con intercalaciones arenosas, arcillosas y de tosca que corresponden a sedimentos medianamente permeables y de baja permeabilidad.

Las características hidrogeológicas señaladas para la cubierta sedimentaria pampiana tiene importancia en relación con: las bajas pendientes topográficas y por ende de la superficie freática; como ya se señalara, y la disponibilidad de agua en exceso susceptible de infiltrarse, al menos en parte, y aumentar el volumen de agua freática, de acuerdo al balance hidrológico de localidades representativas de la Zona Deprimida del Salado. En efecto, los tres factores esbozados, disponibilidad de recarga del agua freática y dificultades para la circulación vertical y horizontal de ésta debido a permeabilidades medianas a bajas y pobres gradientes, permiten suponer su influencia negativa en las épocas lluviosas, coadyuvando al desarrollo de las grandes inundaciones que afectan la región.

Con respecto a las características químicas de calidad del agua freática, se reconoce una zonación, coincidente a grandes rasgos con los sectores geomórficos diferenciados, dada por un incremento de salinidad hacia la porción distal del sector de la Pampa Deprimida de menor pendiente y máxima ex-hondación; coincidente con las menores profundidades de la superficie freática, la cual llega a aflorar, participando en la salinización de los suelos y dificultando la obtención de agua subterránea para uso rural.

2.3. Aspectos edafológicos

Los suelos de la Depresión del Salado se presentan bajo un patrón extremadamente intrincado en el cual ha influido poderosamente el trabajo del agua, durante los ciclos húmedos, sobre sedimentos que obedecen a 2 orígenes diferentes: en tanto que la porción costera, que puede alcanzar hasta algo más de 100 km adentrándose en el continente tiene una clara influencia de materiales marinos, el triángulo interior remanente, es de origen eólico, sin que por ello disminuya la complicada distribución.

El relieve plano que predomina en los paisajes ha determinado procesos de formación del suelo que se traduce en la presencia de un horizonte sódico, el cual constituye una particularidad dominante. Sólo las tierras periféricas con mejor drenaje natural, como los suelos del área periserrana o las márgenes de la Pampa Arenosa o la Pampa Ondulada incluidos por razones hidrológicas dentro del territorio bajo estudio, presentan con cierta generalización - un drenaje más activo, debido a la ausencia de arcilla sódica y a un mejor escurrimiento.

{ Dicho horizonte sódico provee la más seria restricción al movimiento del agua en el perfil del suelo, debido a su baja conductividad hidráulica, - hecho agravado por la ínfima inclinación de la pendiente general de los mismos dentro de la propia Zona Deprimida. Un mesorelieve de moderada expresión perturba el escurrimiento del agua libre superficial y ocasiona el encharcamiento de la misma, cuyas consecuencias restringen el uso productivo de las tierras.

Un manto de sedimentos eólicos, superpuesto a suelos decapitados por la acción del agua superficial ha construido las porciones emergentes del nivel que ocupan los suelos alcalinos y altamente hidromórficos que dominan en las posiciones más bajas del relieve. Estas inclusiones tienen una expresión aislada en las cotas bajas y medias, presentando la mejor aptitud existente para uso agrícola.

El relieve también actúa sobre la proporción de suelos utilizables para la producción agropecuaria y es así que en la porción Este da lugar a un patrón superficial donde alternan numerosas lagunas con suelos de variada aptitud y cañadas de aguas semi-permanentes que se secan en los frecuentes períodos de déficit pluvial. Si bien en el resto de la Zona Deprimida son abundantes las lagunas, la presencia de cauces que obran como colectores del escurrimiento superficial facilita una eliminación del agua de anegamiento del suelo en períodos razonablemente cortos, mejorando sus condiciones de uso para la actividad rural. No obstante ello las zonas alcalinas son más extensas y el gra-

//.

do de esta limitación mayor.

La distribución de las comunidades vegetales tiene estrecha vinculación con los suelos. El drenaje del suelo y la alcalinidad condicionan a las diferentes comunidades a ocupar posiciones diferentes en el relieve, apenas diferenciado todo esto por desniveles del orden de centímetros. La cobertura, la densidad y el porte de la vegetación tienen una probada influencia en el escurrimiento superficial y en la eliminación del agua del perfil del suelo por transpiración de la parte aérea de las plantas, en tanto que la productividad de los tapices herbáceos influyen poderosamente en la economía zonal dado que es el mayor recurso disponible para la ganadería, actividad fundamental en ese aspecto.

//.

3. EL MODELO MATEMATICO

3.1. Generalidades

El modelo que se aplicará en este estudio, discretiza la cuenca en celdas intercomunicadas, y computa, en cada paso de tiempo el balance hídrico en cada celda y las transferencias entre éstas, teniendo en cuenta los volúmenes precipitados y evaporados, la infiltración y los escurrimientos superficiales y subterráneos.

Son funciones de entrada al modelo las series hidrológicas de precipitación y evaporación, y su salida ofrece en cada paso de tiempo el nivel del agua en puntos discretos de la cuenca, el estado de los almacenamientos superficiales y subterráneos en cada celda, así como las correspondientes series de caudales efluentes. Asimismo, de su operación se obtiene el movimiento que realizan sobre la cuenca las masas de agua precipitadas.

Cabe mencionar la existencia de numerosos modelos formulados tales como: el modelo de Standford, el de O' Donnell, el de D' Ayers, el modelo completo y el simplificado de Girard, el modelo C.R.E.C. (Centre de Recherches et d' Etudes de Chatou) de Cormary, el S.S.A.R. (Stream Flow - Synthesis and Reservoir Operations), el modelo de Lacroix, etc.

En particular en nuestro país, cabe citar el modelo de la Cuenca del Plata - Tramo Alto Parana - (1969), modelo del río Limay hasta Alicura - (1973), Río Uruguay en Salto Grande (1974), Zona Norte de Mendoza (1972), Valle del Tulum (1969), Cuenca del Río La Suela (1974), etc.

En el ámbito internacional se destaca entre otros la aplicación del modelo del Mekong, una adaptación de éste en el Río Cai, el modelo del Río Jaguarao, del Río Guadalquivir, etc.

//.

3.2. Submodelo de balance hídrico

La ecuación general del balance hídrico, en una celda puede expresarse en forma simplificada, como:

$$D = \Delta S + Q = P - E - I$$

donde:

- I : representa la infiltración
- Q : representa el derrame superficial (positivo si es saliente)
- P : representa la precipitación
- E : representa la evapotranspiración
- ΔS : representa la variación de las reservas de agua que comprenden las retenciones superficiales, la variación de humedad del suelo, la variación de las reservas de agua subterránea.
- D : representa la precipitación disponible que escurrirá o se almacenará en la celda.

El algoritmo que resuelve la ecuación de balance se obtiene a partir del ecuacionamiento de las leyes que vinculan los parámetros hidrometeorológicos, edáficos y geológicos de la celda, determinando en cada caso la función correspondiente.

El modelo tiene en cuenta en cada paso de tiempo lo ocurrido en pasos anteriores, en términos del estado de los almacenamientos superficiales y subterráneos.

Se verá más adelante que el término D interviene en las ecuaciones de transferencia entre celdas.

//.

3.3. Submodelo de transferencias

El escurrimiento en la zona en estudio se puede representar por una superficie $z = z(x, y)$ que se deforma con el tiempo t .

El análisis de esta deformación puede realizarse mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, de tipo hiperbólico, análogas a las de Saint Venant,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = 0 \quad (\text{ecuación de continuidad})$$

$$-\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gu}{C^2 h} (u^2 + v^2)^{1/2} = 0 \quad (\text{ecuación dinámica en } x)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{gv}{C^2 h} (u^2 + v^2)^{1/2} = 0 \quad (\text{ecuación dinámica en } y)$$

Para la resolución del problema, no es razonable proceder a la discretización de las ecuaciones mediante intervalos Δx , Δy arbitrarios, debido a que la configuración física del dominio de integración en el prototipo, presenta límites internos tales como terraplenes, lomas, cursos de agua, los que definen "cajas" en las que el nivel de agua se puede suponer uniforme.

Por lo tanto, se recurrió a un esquema similar al adoptado en el modelo del Mekong, donde los límites entre elementos discretos en el modelo se corresponden con límites físicos en el prototipo.

Asignando un valor medio al nivel de agua en cada celda resultante de la discretización, y despreciando los términos de inercia, dado que las crecidas son suficientemente lentas, puede plantearse la ecuación de continuidad para una celda i como:

$$S_i(z_i) \frac{\partial z_i}{\partial t} = D_i(t) + \sum_k Q_{ik}(z_i, z_k)$$

donde:

z_i, z_k son funciones de tiempo

k : representa los índices de las celdas relacionadas con la celda i .

S_i : superficie del plano de agua

z_i : cota del nivel de agua

D_i : volumen de agua resultante del balance hídrico

Q_{ik} : caudal que pasa de la celda k a la celda i

//.

Se asume que:

$$S_i = f(Z_i)$$

$$Q_{ik} = f(Z_i, Z_k)$$

Repetiendo el planteo para todas las celdas, resulta un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de 1º orden en Z_i y Z_k . Expresándolas en diferencias finitas, admitiendo que S_i no varía entre los niveles Z_i y $Z_i + \Delta Z_i$ e integrando, se obtiene:

$$S_i \Delta Z_i = D_i \Delta t + \Delta t \sum_k Q_{ik}(Z_i, Z_k)$$

donde: ΔZ_i son incógnitas

Estas ecuaciones forman un sistema de ecuaciones resolubles, expresando debidamente las funciones

$$Q_{ik} = f(Z_i, Z_k)$$

que dan los intercambios de agua entre la celda i y sus adyacentes k .

Las funciones Q_{ik} son esencialmente de dos tipos:

- Tipo fluvial, cuando el escurrimiento no encuentra obstáculos localizados (pérdidas de carga singulares), y su pérdida de carga depende de una rugosidad media (ley de Chezy).
- Tipo no fluvial, cuando un obstáculo, por ejemplo una ruta y sus orificios constituyen el límite entre dos celdas (leyes de vertedero y orificios).

Adoptando:

$$Q_{ik} = (1-\alpha) Q_{ik}(t) + \alpha Q_{ik}(t+\Delta t)$$

donde el último término se desarrolla por Taylor y reemplazando:

$$\left[\sum_k \frac{\partial Q_{ik}}{\partial Z_i} \frac{S_i}{\alpha \Delta t} \right] \Delta Z_i + \left[\sum_k \frac{\partial Q_{ik}}{\partial Z_k} \right] \Delta Z_k = -\frac{1}{\alpha} \left[\frac{D_i(t)}{\Delta t} + \sum_k Q_{ik} \right]$$

Variando los subíndices i y k se obtiene el sistema de ecuaciones que permiten determinar para cada instante t la superficie $z(x, y)$. Este sistema de ecuaciones junto con las condiciones iniciales y de borde, resuelven el problema.

//.

3.4. Calibrado y explotación

La etapa de calibración del modelo comprende la definición de los parámetros que intervienen en las ecuaciones de balance y transferencia y se realiza por "prueba y error" ajustando los valores por contraste entre series - conocidas - históricas - y generadas por el modelo.

La explotación del modelo consiste básicamente en generar la respuesta de la cuenca ante eventos hidrológicos, crecidas y sequías de recurrencia conocida. Primeramente ello se realizará en las condiciones actuales en que la cuenca se encuentra, y luego con la inclusión de obras y prácticas de manejo que se determinen como proyectos alternativos.

La implementación de estos proyectos será simulada en el modelo matemático, con el objeto de prever la respuesta de la cuenca a cada uno de ellos, tanto en términos de recuperación de tierras para la producción, cuanto en términos de la modificación de rendimientos que pueda alcanzarse.

Las respuestas obtenidas indicarán cuáles son los efectos de estos proyectos alternativos en la propagación de las crecidas, duración de las secas, etc.; efectos sobre los que se realizará el cálculo de los beneficios directos por incremento de la producción, así como de los beneficios indirectos - debido al aumento del valor de la tierra en razón del incremento productivo, de la seguridad de la producción, etc.